

# ホール推進機のシース構造と性能評価に関する研究

山 村 有 希

要 旨

電気推進機は軽量のため人工衛星の姿勢制御・軌道保持の用途に適している。そのため、宇宙空間における推進機として使用されており、近年、宇宙構造物の大型化に伴って推進機のさらなる高効率化が求められる中、高比推力・低加速度であるホール推進機は宇宙空間における長期ミッションに適した推進機として注目されている。電気推進機は太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換し、積載燃料ガス（主に Xe）をプラズマ化して推進エネルギーに利用する方式をもつ。宇宙空間においては推力の大きさはもとより寿命の長さも重要な要素となるため、電気推進機の中でも推力と燃料噴射時間（比推力）のバランスが適切であるホール推進機には将来への大きな期待が持たれている。しかしながら、プラズマ生成過程の解明が未だ不十分であり、特にプラズマ生成時に発生する放電電流の不安定振動は電源系に負荷を与えるという重大な問題を引き起こすため、その解明が急務である。その現象がもたらす性能悪化に対する改善が早急に望まれる。それにもかかわらず、放電振動の抑制とその推進効率への影響に関する報告が極めて少なく、時間的および予算上の制約があるためシミュレーションの必要性が叫ばれている。さらに、放電室壁シースの情報の実験上の困難さから不十分である。シース内部構造の把握は、シース自体が非常に狭い範囲に形成されるため、その実験的観測は困難を極める。よって、シミュレーションによるアプローチが不可欠となる。そこで、本研究の目的は、THT-VI（SPT100）および TALT-2a ホールスラスタの実験に基づき、粒子間衝突による放電電流振動の安定化およびその振動抑制が推進効率に与える影響を検討し、推進性能評価を行い、さらに内壁シースシミュレーションを示すことである。本研究では、THT-VI および TALT-2a ホールスラスタの作動実験を行い、イオン電流振動と推進性能に関する実験データを取得した。放電振動は主としてイオン振動がそのほとんどを担っているため、イオン・中性粒子衝突に注目する。放電振動のメカニズム解明に向け、本研究では放電振動の本質的效果である生成プラズマイオンの輸送効果を新たに考慮し、シミュレーションモデルを導出した。放電振動のモデリングでは、スラスタのチャンネル内中心部およびシース付近領域における放電電流振動の計算モデルをそれぞれ導出している。シース付近では、シース電場により軌道を変えるイオンが存在し、その交差場イオン輸送（Cross-field 輸送）の効果は推進性能に大きな影響を与えることがわかっている。そこで、推進機内壁に形成されるシース構造を知る目的で、シースモデルを提起し、シミュレーションを実施した。イオン速度、シース電位をはじめ各粒子の密度分布を計算により示した。すなわち、これまで把握されていなかったシース内部の粒子分布を明らかにした。そして、本計算モデルによりイオン・中性粒子衝突によるプラズマ振動を模擬し、推進機内におけるイオン移動度の低減および放電チャンネル断面積の縮小がイオン電流振動の安定化に効果的であることを示した。ま

---

学位記番号と学位：博第44号，博士（工学）

授与年月日：平成21年3月19日

授与時の所属：大学院工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程

た、それにより安定化されたイオン電流振動が、推進効率の向上を促す結果を得た。この情報は、推進機設計に活かせる知見と考えられる。また、スラスタ推進性能評価を行うため、推力、比推力、推進効率の放電電圧依存性に関する計算を検討し、実験から得た実測データとの比較を行い、本研究の実験と計算モデルの妥当性、および実験結果の再現性を示した。

本論文は 9 章より構成されている。本論文の各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章は序論であり、宇宙開発の背景とホール推進機の必要性および課題について述べ、本研究の意義と目的、および論文構成を説明している。

第 2 章では、電気推進機の種類について述べ、ホール推進機のエンジンの動作原理、スラスタチャンネル内におけるプラズマ粒子の挙動およびイオン輸送について述べている。

第 3 章では、実験装置と実験方法について述べている。実験装置の概略をはじめ実験機として使用するホールスラスタ（SPT100 スラスタ、TALT-2a スラスタ）についてその機能、並びに仕様を示し、実験方法および実験手順を述べる。

第 4 章では、SPT100 スラスタおよび TALT-2a スラスタにおける作動実験結果をそれぞれ示す。ここでは、イオン電流振動および推進性能に関する実験結果を示している。

推進機内壁に形成されるシースは Xe イオンの輸送軌道に影響を与えるため、第 5 章では、そのシース構造を明らかにする目的で、シースシミュレーション結果を示している。推進機内壁に形成されるシース構造に関するシミュレーションを実施し、シース中におけるイオン速度、シース電位をはじめ各粒子密度分布をシミュレーションにより示した。

第 6 章では、推進機内におけるイオンの輸送効果を考慮した放電電流振動の新モデルを提案し、実測との対応性を検討している。スラスタ内の中心部およびシース付近におけるイオン電流振動を表すため、計算モデルをそれぞれ導出した。電流振動の安定化においては、イオン移動度の低減および放電チャンネル断面積の縮小が振動の安定化に効果的であるという結果を明らかにし、電流振動の安定化が推進効率に与える影響をシミュレーションにより検討している。安定化された電流振動の安定化が、推進効率の向上を促すことを計算により示した。さらに、本研究で提案する計算モデルと他研究機関で得られた実験結果との対応性を検討した。これらの結果から、本計算モデルの適応性、並びに実験結果の再現性および本計算モデルの妥当性を示した。

第 7 章では、ホールスラスタの推進性能評価を行うため、スラスタの基礎作動実験結果と推進性能に関する計算モデルとの比較検討を行っている。ホール推進機の性能を評価する推力、比推力、推進効率の放電電圧依存性に関する実測を用い、導出した計算モデルによりその実験結果の再現性を示すとともに、本研究における実験と計算の妥当性を示し、計算モデルの実機への利用可能性を明らかにした。

第8章では、本研究で得られた結果を総括し、内壁シース構造、放電電流振動、推進性能評価に関する結論を述べ、考察をした。

第9章では、本研究の成果とまとめ、および今後の課題を述べ、将来展望について述べている。

本研究で提示した計算モデルから導かれた計算結果は実験結果を含んでおり、ホール推進機における放電電流不安定性を抑制するための指針、および内壁シース構造の解明、推進性能の改善に資する情報を提供しており、将来のスラストデザインへの利用と実機への搭載可能性を明らかにしている。以上の知見は、宇宙工学およびプラズマ工学に寄与する成果と考えられる。

主指導教員 根 城 安 伯

## An investigation on the sheath structure and the performance of Hall thrusters Doctor Course in electrical and electronic engineering

Yuki YAMAMURA

### Abstract

The electric propulsion has been used for orbit correction of satellites as a compact thruster. Recently, as the spacecraft scale up, thrusters with higher thrust and efficiency are strongly required. Hall thrusters are expected to be used as main thrusters for near-earth missions in the United States and Europe because 1-2 kW class Hall thrusters can achieve a high performance of thrust 50-100 mN and thrust efficiency 40-50 % at specific impulses of 1000-2000 sec. The features of the Hall thruster are as follows. It converts solar energy into the electric energy on the solar paddle, ionize the neutral gas by the discharge and use ionized ions as a thrust of spacecraft. The Hall thruster is suitable for a long-term mission in space because it has the features of high thrust and suitable value of specific impulse among electric thrusters. However, we have some problems such as the instability of the discharge current oscillation and the improvement of the thrust efficiency in order to improve performance by understanding inner physical phenomena in the channel of Hall thrusters. In particular, the investigation of the plasma oscillations associated with the collision between ions and neutrals has not been well-established in the field of the electric propulsion. It is important to develop a reliable model that improves our understanding of the factors which control discharge oscillation when we attempt to improve the existing Hall thruster designs. Sheath is formed in the region near the channel wall. It bends the direction of exhausting ions to the wall. It is called “cross-field transport”, which is closely related to the performance and the discharge oscillation of the Hall thrusters. When the discharge instability occurs, the oscillation not only imposes a load on the system of the power supply but even runs the operation of the thruster down. Therefore, information of the ion current oscillation is significant to develop the Hall thrusters. The 1 kW class Hall thrusters have the thrust and specific impulse ranged from 35 to 100 mN and from 1000 to 3000 sec, respectively, at discharge voltages of 200-400 V with mass flow rates of 1-3 mg/s in a wide input power range of 1200-1800 W, and thrust efficiency ranged from 40 to 50 % has been achieved.

The aims of this investigation are to show the inner sheath structure, and know the way of enhancement of thrust efficiency, which contains a stability of discharge current and the performance for the Hall thrusters by demonstrating numerical simulation comparing with the experimental results.

The author demonstrates the sheath structure near the inner wall of Hall thrusters by simulation since there are no experimental data. In order to clarify the sheath structure, a simulation associated with the equation of momentum transfer with the ion-neutral collision and Poisson's equation having dust grains is performed. The oscillating sheath by including dust grains and secondary electrons has been exhibited. These results are new information for the inner sheath structure since it is shown that the simulation results of the sheath differ from the velocities and the density distributions shown in the traditional ones.

In order to describe the discharge current oscillation correctly, the author introduces a new model considering the cross-field transport for Xe ions in the channel of the Hall thruster. It is shown the simulation results comparing with the experimental results on THT-VI (SPT100) Hall thruster and TALT-2a Hall thruster. It is shown for the first time that the ion current oscillation becomes stable by decreasing the ion mobility and the cross sectional area of the channel. It is also shown that the thrust efficiency is improved when the ion current oscillation is stabilized by decreasing the ion mobility. In order to develop the performance, it is significant to consider the effect of the cross-field transport on the oscillation.

For the development of thrust performance, the author demonstrates simulations of the thrust, specific impulse and thrust efficiency due to the discharge voltages comparing with the experimental results, respectively, to show the validity of the simulation models. Making simulations corresponding to the experimental results on the thrust performance, the author demonstrates the suggestion to improve the performance of Hall thrusters.

The thesis consists of 9 chapters. An introduction, the background and the purpose of this investigation are described in Chapter 1. Chapter 2 describes a construction of Hall thrusters among the electric propulsion. It includes the description of the phenomena of the behaviors of plasma particles in the channel of Hall thrusters. In Chapter 3, we show the experimental facilities, and SPT100 Hall thruster and TALT-2a Hall thruster which are used in the experiment. Chapter 4 shows the experimental results. In order to study the structure of the sheath near the inner wall of the Hall thruster, a simulation associated with the equation of momentum transfer with the ion-neutral collision and Poisson's equation having dust grains is performed in Chapter 5. It is shown the oscillating sheath by including dust grains and secondary electrons. The author has been performed simulations of the ion velocity, the potential, the density distributions and the space charge density. In Chapter 6, a new model for the ion current oscillation by considering the cross-field transport of Xe ions is proposed. The author shows the simulation result for the control of the ion current oscillation comparing with the experimental results, and demonstrates the influence of the cross-field ion transport to the thrust efficiency. In Chapter 7, the author demonstrates numerical simulations of performances corresponding to the experimental results to show the validity of this investigation. Chapter 8 presents a conclusion and the summary of the results obtained from this investigation. Chapter 9

introduces the prospects of the field of the electric propulsion in the future.

These facts imply that the results may be applicable to improve the thrust efficiency of Hall thrusters. Therefore, the findings obtained in this investigation are possible to be useful information for the improvement of the performance, and to apply the future design of Hall thrusters.

Professor(Chairperson) Yasunori NEJYOU